

# S08 MCMC法を用いたFSRQ型活動銀河核ジェットのSED解析

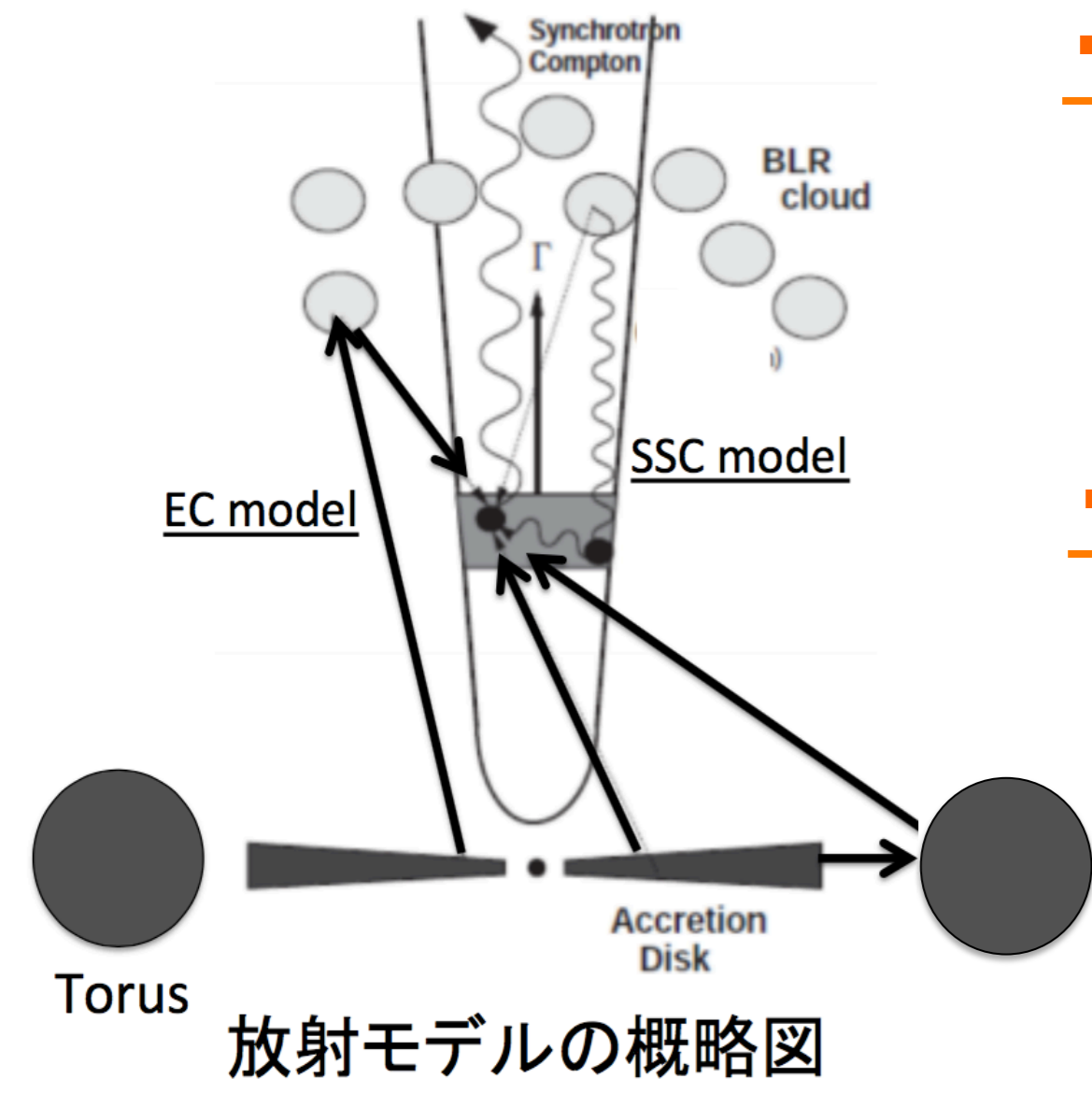
平出尚義、深沢泰司、植村誠、山田悠梨香 (広島大学)



## 1. Abstract

ブレーザーの中でも特に高度が大きい天体をFlat-Spectrum Radio Quasar(FSRQ)と呼ぶ。FSRQは遠くの天体まで見るとともに、降着円盤からの放射も見えているので、大質量ブラックホールの進化をジェットと降着円盤に関して調べることができる。また、FSRQのエネルギースペクトル分布(SED)からジェットのパラメータを推定することができる。従来はFSRQの放射の理論式は複雑かつパラメータの多さから計算量が多く、SEDのfitが困難であったため、いくつかのパラメータを固定して主観的な推定を行っていた。そこで、放射式の近似法を用いて計算の高速化を行い、かつマルコフ連鎖モンテカルロ法を適用することで、不定性を含めたジェットの物理パラメータを推定する。本研究ではブレーザー天体3C279の多波長ライトカーブを作成し、議論する。その結果、フレア時期においてガンマ線とX線、可視光が強い正の相関があることが確認された。

## 2. FSRQの放射モデル



### ・Synchrotron Self Compton(SSC)

ジェット中の相対論的な速度になった電子が種光子を出すと同時に、同領域の種光子を逆コンプトン散乱するモデル。

### ・External Compton(EC)

種光子がジェット以外の場所である  
降着円盤  
広輝線領域(BLR)  
分子雲トラス  
からも放出され、逆コンプトン散乱するモデル。

## 3. 放射モデルの理論式

### ・観測されるシンクロトロン放射フラックス

$$f_{\nu}^{syn} = \frac{\delta_D^4 \epsilon' J'_{syn}(\epsilon')}{4\pi d_L^2} = \frac{\sqrt{3} \delta_D^4 \epsilon' e^3 B}{4\pi h d_L^2} \int_1^{\infty} d\gamma' N_e'(\gamma') R(x)$$

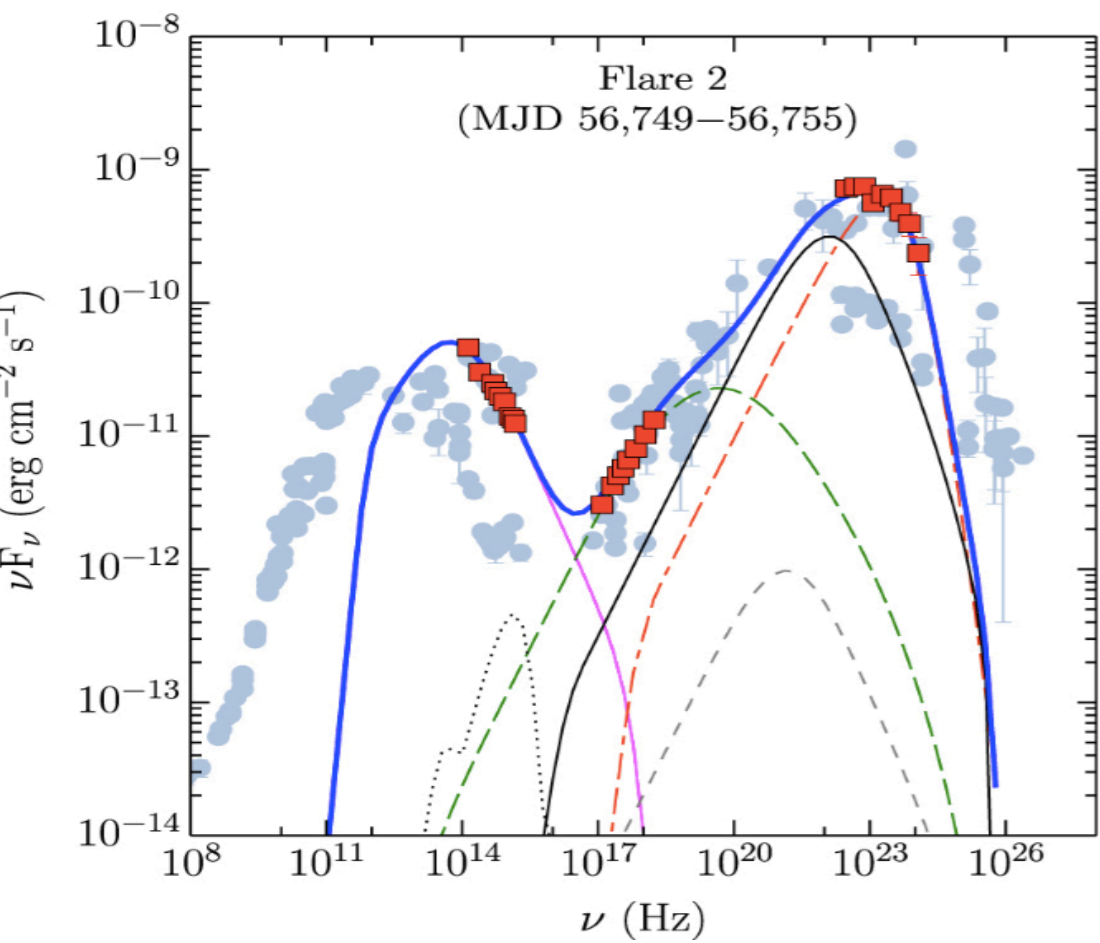
- ・B: 磁場
- ・ $N_e$ : 電子のエネルギー密度分布 (EED)
- ・ $\delta_D$ : ドップラー因子
- ・ $d_L$ : 光度距離
- ・逆コンプトン散乱成分は6重積分であり、計算に時間がかかる

$$\epsilon_s j(\epsilon_s, \Omega_s) = m_e c^3 \epsilon_s^2 \int d\Omega \int d\epsilon n_{ph}(\epsilon, \Omega) \times \int d\Omega_e \int d\gamma n_e(\gamma, \Omega_e) \times (1 - \cos\psi) \frac{d\sigma}{d\epsilon_s d\Omega_s}$$

### ・観測される逆コンプトン散乱フラックス

$$f_{\nu}^{obs} = \frac{V_b \epsilon_s j(\epsilon_s, \Omega_s)}{d_L^2}$$

$n_{ph}$ : 入射種光子の数密度  
 $n_e$ : 入射電子の数密度  
 $V_b$ : ジェットの放射領域の体積



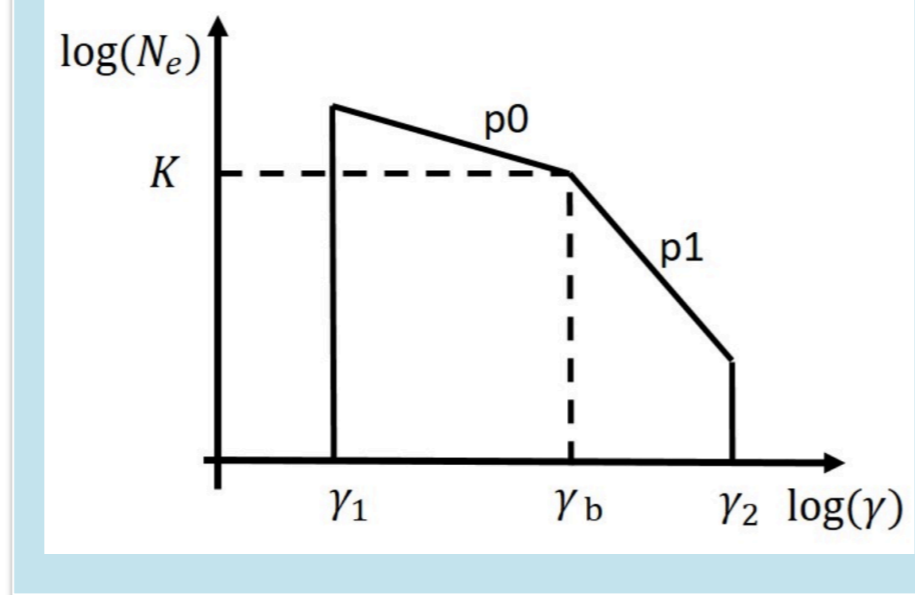
### 従来の方法:

観測で得られるエネルギースペクトルを、パラメータをいくつか固定し、目でfit。  
Paliya.et.al(2015)

### 問題点:

- ・最適解なのかわからない
- ・不定性を議論できない

### ・EED (broken-power-low)



## 4. 放射モデルの高速計算化

MCMC法では、放射モデルに値を変えながら10万回ほど計算を行うので、1回あたりの計算時間を短くする必要がある。そのためにFinke.et.al(2016)にある近似法をC++で記述した。

### ・Head-on-Approximation

逆コンプトン散乱の後、光子と電子が同じ方向に散乱する近似法

条件:  $\epsilon \ll m_e c^2 \ll \gamma$

$\epsilon$ : 光子(赤)のエネルギー  
 $\gamma$ : 電子(青)のエネルギー

### ・Delta function approximation

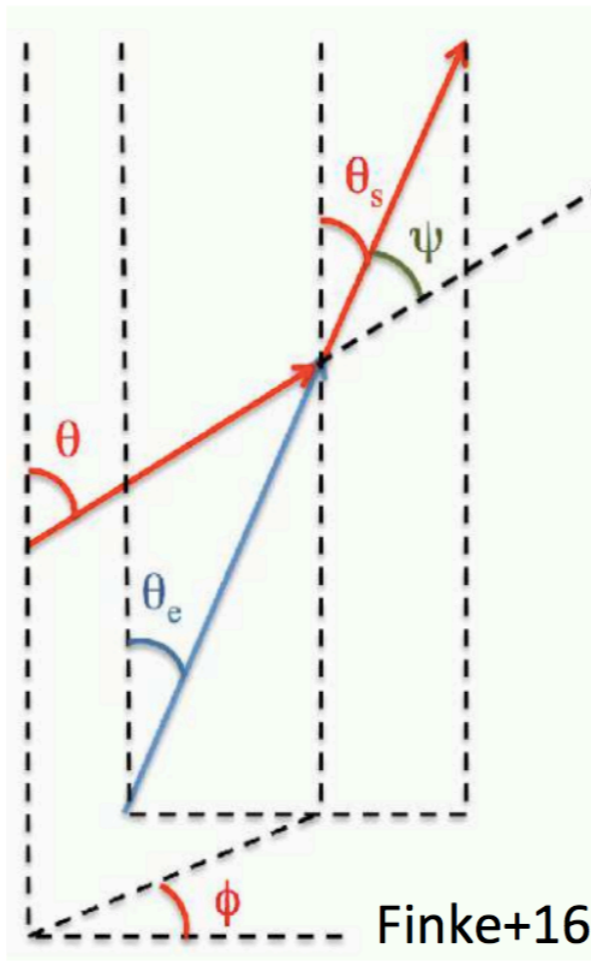
散乱される光子のエネルギーや、AGNの見込み角に制限をつけ、デルタ関数化。

### ・近似を用いた場合の逆コンプトン散乱フラックス

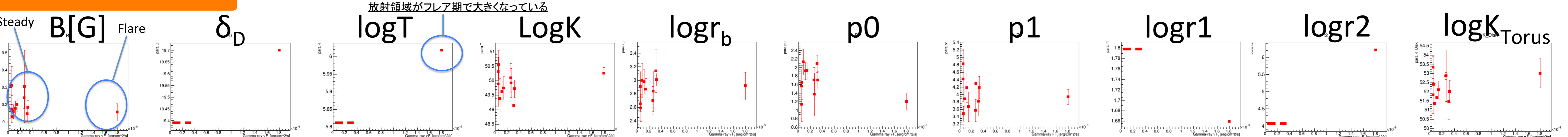
$$f_{\nu}^{obs} = \frac{c \sigma_T \epsilon_s \delta_D^3}{5\pi d_L^2} \int_0^{2\pi} d\phi \int_{-1}^1 d\mu \int_0^{\infty} \frac{d\epsilon}{\epsilon^2} u(\epsilon, \Omega) N_e' \left( \frac{\gamma}{\delta_D} \right) S_3(\gamma\epsilon(1 - \cos\psi))$$

上式に降着円盤, BLR, トラスの種光子エネルギー密度を代入することでSEDのfitが可能となる。使用した各成分の種光子エネルギー密度は以下の通りである。また、この近似を行うことで1積分あたりおよそ10倍程度の計算速度となるので、MCMCの高速化が可能となる。

- ・降着円盤成分 (見込み角、種光子のエネルギーをデルタ関数近似)  
 $L_{disk}$ : 降着円盤光度  $\epsilon_0$ : 種光子エネルギー ( $3.0 \times 10^{-5} m_e c^2$  [keV])
- ・BLR成分 (BLRの半径と種光子のエネルギーをデルタ関数近似)  
 $\xi_{ii}$ : BLR散乱効率  $\epsilon_{ii}$ : 種光子エネルギー ( $2.0 \times 10^{-9} m_e c^2$  [keV])
- ・トラス成分 (トラスの半径、見込み角と種光子のエネルギーをデルタ関数近似)  
 $\xi_{dt}$ : トラス散乱効率  $2.7\theta$ : 種光子エネルギー ( $4.5 \times 10^{-7} m_e c^2$  [keV])



## パラメーター一覧



## 5. 多波長衛星解析と結果

放射の理論式、ならびにMCMC法をC++にて記述し、パラメータの推定を行った。

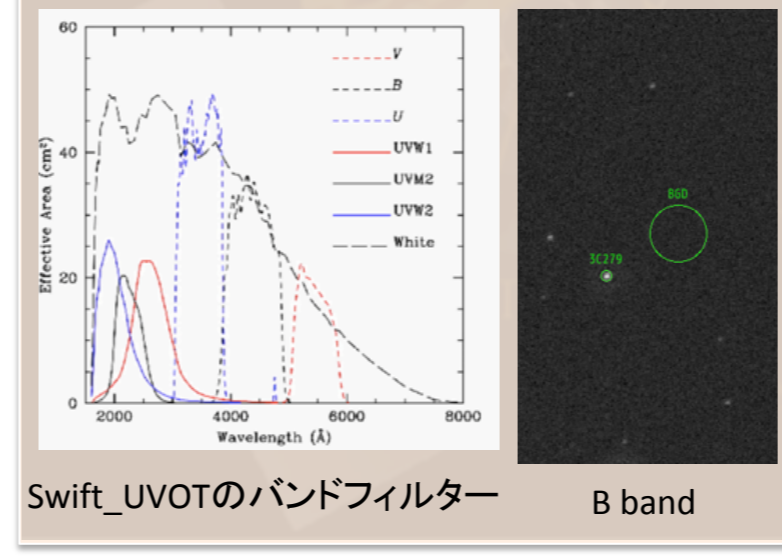
対象天体: 3C279 多波長観測データ, Hayashida.et.al(2012),(2015)

+私自身が解析した多波長データ(Swift\_UVOT, Swift\_XRT, Fermi\_LAT)+ALMAアーカイブデータ

### ・解析手法

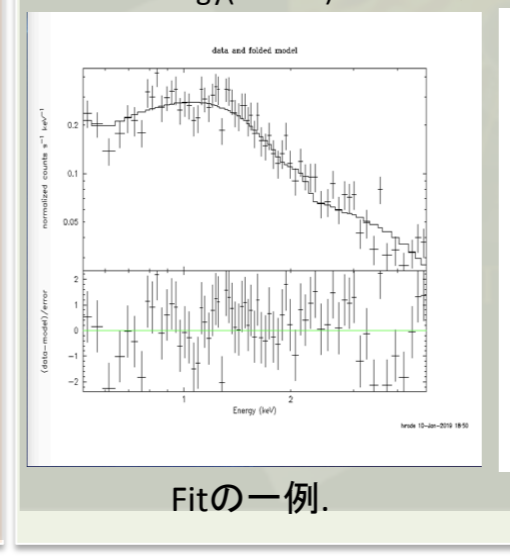
#### Swift\_UVOT(可視・紫外)

V, B, U, W1, M2, W2の6バンドに対してFluxを求めた。 Source region: 半径5秒角の円 Background region: 半径25秒角の円 その後、Extinctionの補正をかけた。



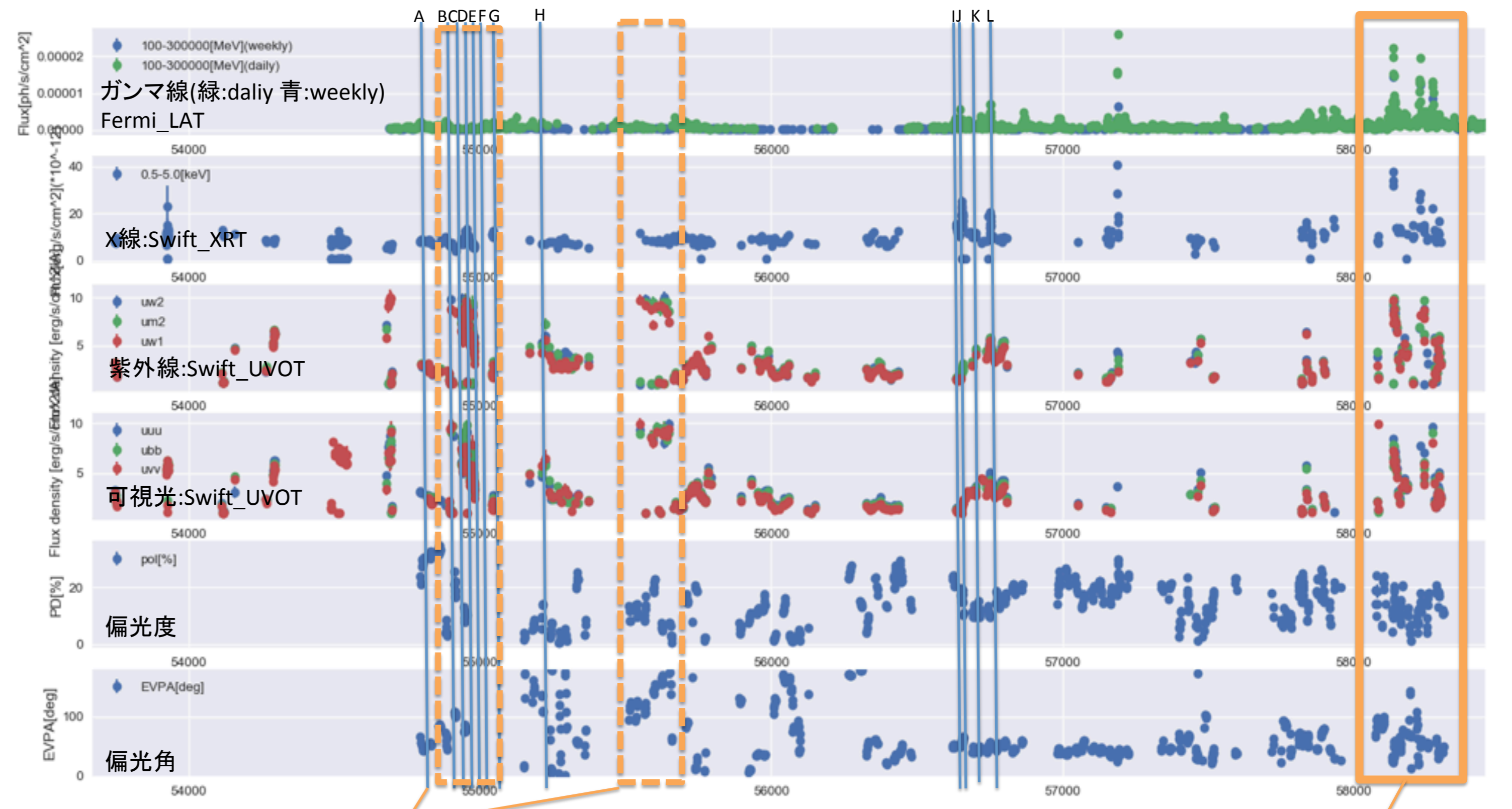
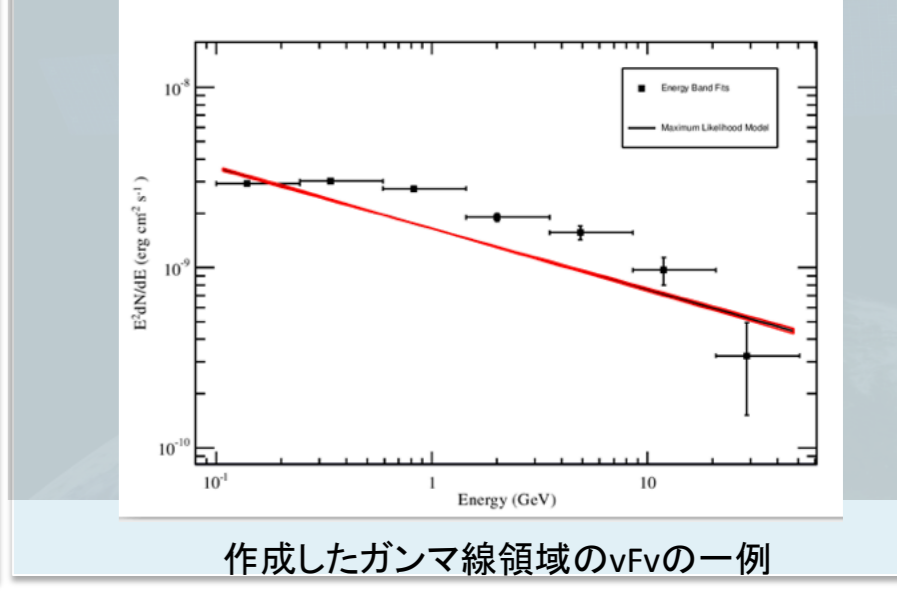
#### Swift\_XRT(X線)

PC modeで解析。 xspecのモデルにはwabs\*pegpwlwを使用。 Input parameter: -nh(固定) -photonindex(single power law) -min energy(0.5keV) -max energy(5.0keV) -norm of the parameter



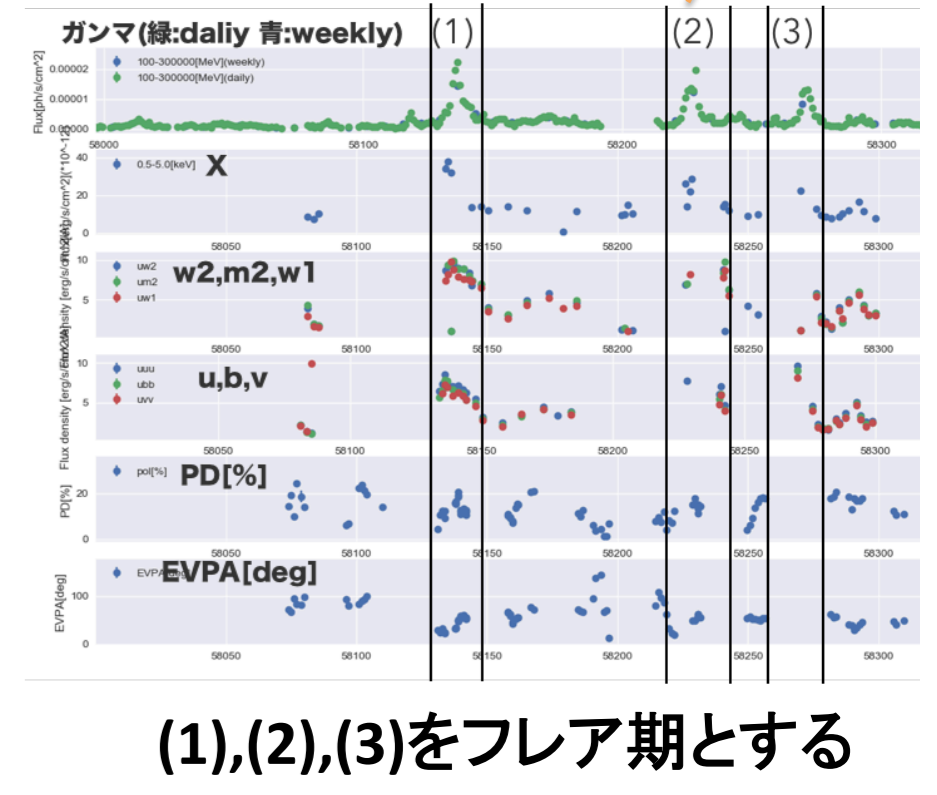
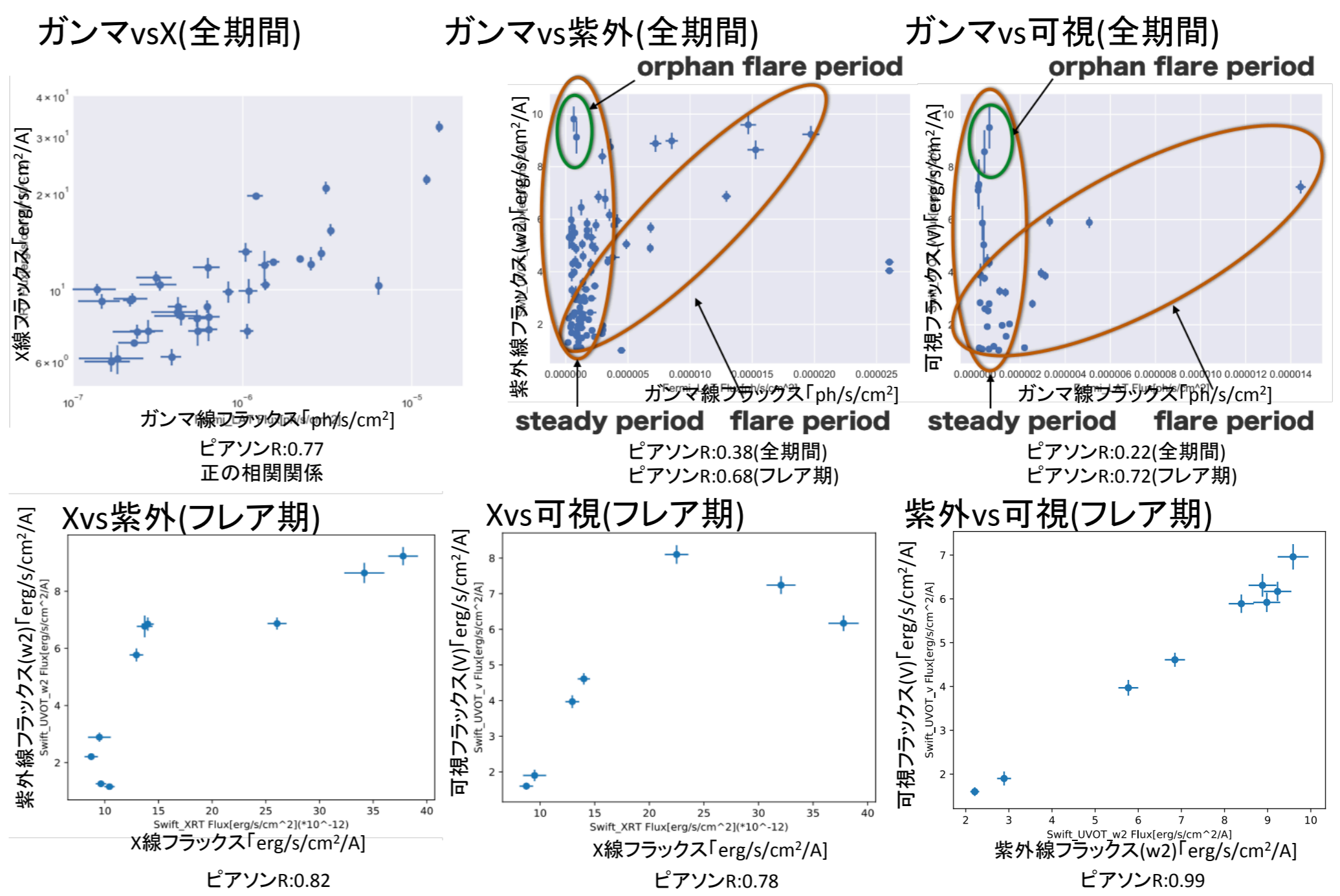
#### Fermi\_LAT(ガンマ線)

光子一つ一つに対して尤度を計算する Unbinned解析を行った(1週間区切り) その後、SEDを作成



### 可視光フレア(Orphan flare期) 解析した3C279の多波長ライトカーブ

### ・多波長ライトカーブの相関関係(全期間orフレア期)



**解析条件**  
各波長帯のデータは0.5日以内で最も近い点を選択した。  
Flare period ... (1), (2), (3)の点  
Orphan flare period ... 可視光フレアの点  
Steady period ... 上記以外の定常時の点

**相関からわかること**  
・フレア期においては全ての波長帯において正の相関関係が見られる。  
・可視光のみで明るく輝く時期がある。(Orphan flare)

### ・SED作成とMCMC推定

#### 推定条件

A~Lの期間+2018年のフレア(3)に対してMCMC推定 尤度計算は下式を使用した。

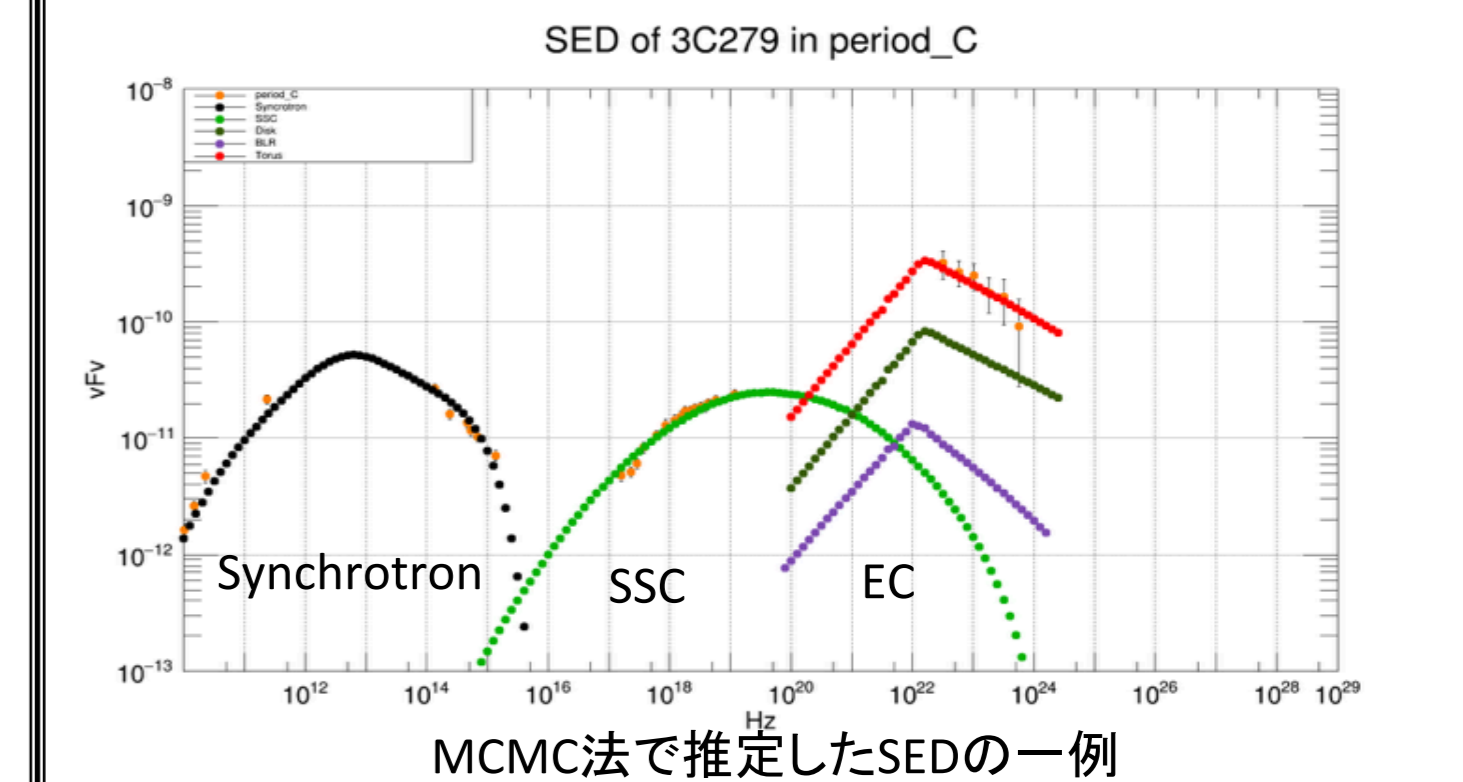
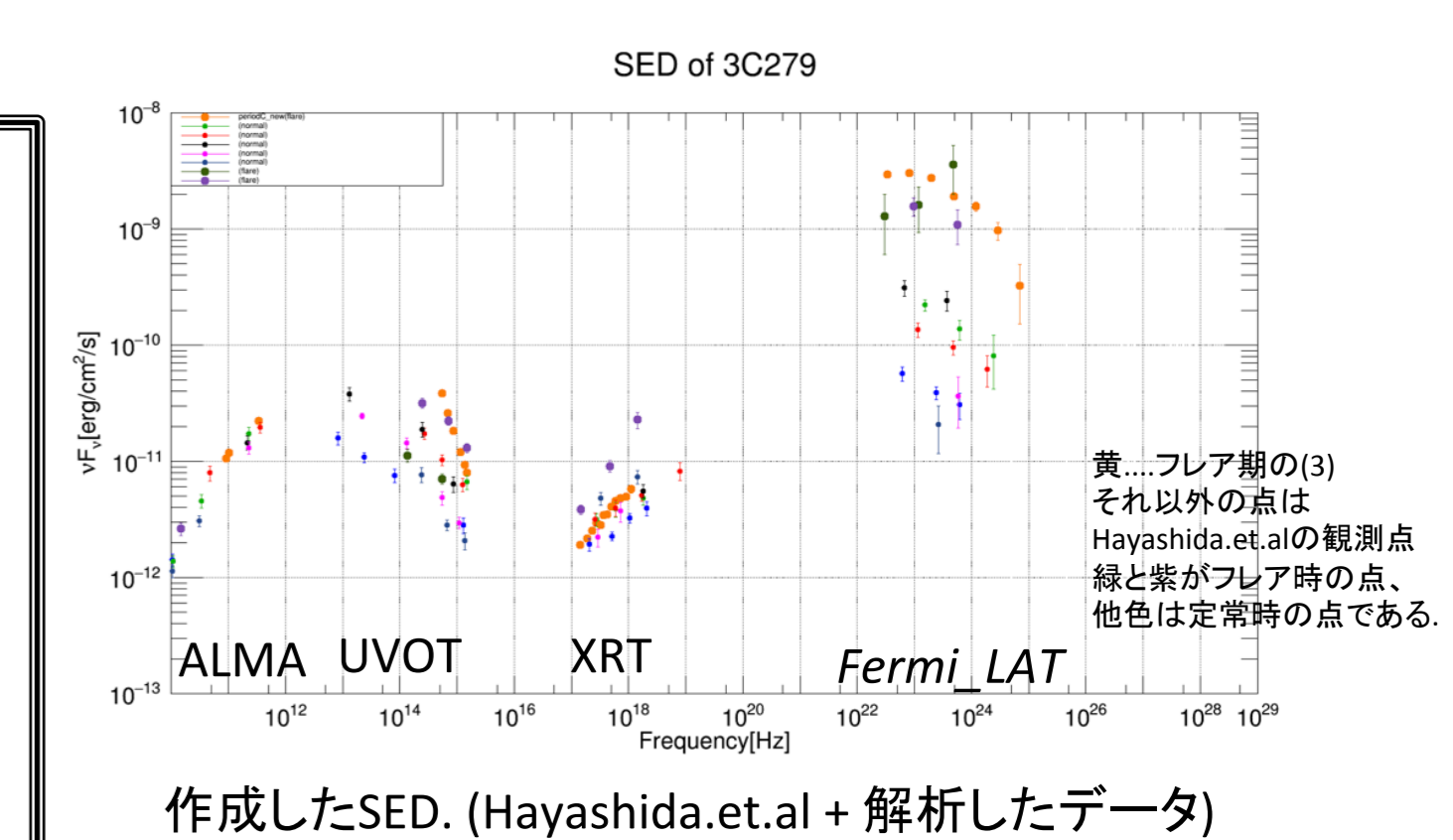
$$L = \prod_{i=1}^N \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} \exp\left(-\frac{(d_i - f^{syn})^2}{2\sigma_i^2}\right) (\nu < 10^{17} \text{ Hz})$$

$$L = \prod_{i=1}^N \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} \exp\left(-\frac{(d_i - f^{SSC})^2}{2\sigma_i^2}\right) (10^{17} < \nu < 10^{21} \text{ Hz})$$

$$L = \prod_{i=1}^N \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} \exp\left(-\frac{(d_i - f^{EC})^2}{2\sigma_i^2}\right) (\nu \geq 10^{21} \text{ Hz})$$

parameter	symbol
Magnetic field	B
Doppler factor	$\delta_D$
Normalization of electron distribution	$\log_{10} K_e$
Variability time scale	$\log_{10} T$
Spectral 1 index of electron energy distribution	$p_0$
Spectral 2 index of electron energy distribution	$p_1$
Lorentz factor (Min)	$\log_{10} r_1$
Lorentz factor (Max)	$\log_{10} r_2$
Cut-off lorentz factor	$\log_{10} r_b$
Normalization of Torus component	$\log_{10} K_{Torus}$

本研究では、 $r_1, r_2$ を固定して推定している。



### Results

- ・MCMC法でのパラメータ推定が可能となり、不定性を含めたパラメータ変動が確認。
- ・静穏期とフレア期で異なるパラメータ推定。
- ・今後は解析したデータからサンプル数を増やし、系統的なジェットの物理描像を探求する。